



# **L'équilibre général et la prévision énergétique**

## **Étude du modèle d'analyse des politiques liées à l'énergie au Canada**

**Mémoire**

**François Lemoyne**

**Maîtrise en économie**

Maître ès arts (M.A.)

Québec, Canada

© François Lemoyne, 2013



## Résumé

Mon mémoire s'articule autour de deux objectifs distincts. En premier lieu, je présente un modèle d'équilibre général utilisé par Ressources Naturelles Canada pour obtenir des prévisions énergétiques sur l'économie canadienne : le modèle d'analyse des politiques liées à l'énergie au Canada, ou MAPLE-C.

En deuxième lieu, je réalise une étude de cas avec MAPLE-C sur la mise en œuvre d'une politique publique obligeant l'utilisation du gaz naturel comprimé par le transport lourd et sa conséquence sur l'émission de gaz à effet de serre. J'observe une réduction globale des gaz à effet de serre alors que le transport lourd utilise une source d'énergie moins polluante que le pétrole. J'observe aussi un réajustement de l'économie alors que les consommateurs abandonnent le gaz naturel, devenu plus cher. Toutefois, dû aux limitations du modèle, je suis dans l'impossibilité de statuer sur les effets positifs et négatifs.



# Table des matières

<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>III</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>IX</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>XI</b>
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>2. REVUE DE LA LITTÉRATURE</b> .....	<b>3</b>
<b>3. LES MODÈLES D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL DANS LE DOMAINE DE LA PRÉVISION ÉNERGÉTIQUE</b> .....	<b>7</b>
3.1. LES MODÈLES D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL .....	7
3.2. NEMS & MAPLE-C.....	9
3.3. LE MODÈLE POUR L'ANALYSE DES POLITIQUES LIÉES À L'ÉNERGIE AU CANADA .....	16
<b>4. ÉTUDE DE CAS : LES EFFETS DE L'UTILISATION DU GAZ NATUREL DANS LE TRANSPORT DE MARCHANDISES SUR L'ÉCONOMIE ÉNERGÉTIQUE CANADIENNE</b> .....	<b>19</b>
4.1. DÉFINIR LES SCÉNARIOS.....	19
4.2. INTÉGRER LES SCÉNARIOS .....	21
4.3. ÉTUDE DES SCÉNARIOS.....	24
<b>5. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS</b> .....	<b>33</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>35</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>37</b>
A.1 – UTILISATIONS FINALES ET SOURCES D'ÉNERGIE DANS LA DEMANDE RÉSIDENTIELLE .....	37
A.2 – TYPES DE COMMERCE POUR LE MODULE DE LA DEMANDE COMMERCIALE .....	37
A.3 – UTILISATIONS FINALES ET SOURCES D'ÉNERGIE DANS LE SECTEUR COMMERCIAL .....	37
A.4 – DIVISIONS UTILISÉES DANS LE MODULE DE LA DEMANDE INDUSTRIELLE.....	38
A.5 – UTILISATIONS DU CHARBON CONSIDÉRÉES DANS LE MODULE DU MARCHÉ DU CHARBON.....	38
A.6 – SOURCES D'ÉNERGIE CONSIDÉRÉES DANS LE MODULE DES CARBURANTS RENOUEVABLES .....	38
A.7 – ORDRE D'APPEL DES MODULES PAR LE MODULE INTÉGRATEUR POUR NEMS .....	39



## Liste des tableaux

TABLEAU 1 - POURCENTAGE DE PÉNÉTRATION DES TECHNOLOGIES POUR LE TRANSPORT DE MARCHANDISES .....	23
TABLEAU 2 - OFFRE DE GAZ NATUREL AU CANADA EN 2020(PÉTAJOULES PAR ANNÉE).....	25
TABLEAU 3 - PRODUCTION DE PÉTROLE AU CANADA EN 2020 (MILLIERS DE BARILS PAR JOUR) .....	26
TABLEAU 4 - PRIX POUR LE GAZ NATUREL ET DES DÉRIVÉS DU PÉTROLE AU CANADA EN 2020 .....	27
TABLEAU 5 - CONSOMMATION D'ÉNERGIE AU CANADA EN 2020 (PÉTAJOULES PAR ANNÉE) .....	28
TABLEAU 6 - CONSOMMATION DE GAZ NATUREL PAR SECTEUR AU CANADA EN 2020 (PÉTAJOULES PAR ANNÉE).....	28
TABLEAU 7 - CONSOMMATION D'ÉNERGIE PAR SOURCE DU SECTEUR .....	29
TABLEAU 8 - ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE, PAR TYPE ET PAR SECTEUR, AU CANADA EN 2020.....	30
TABLEAU 9 - DONNÉES SUR L'ÉCONOMIE CANADIENNE EN 2020 .....	31



## Liste des figures

FIGURE 1 - PREMIÈRE PAGE DE MAPLE-C AVEC LE SCRIPT <i>RUNNEMS</i>	17
FIGURE 2 - PAGE DE CONFIGURATION DE MAPLE-C AVEC LE SCRIPT <i>RUNNEMS</i>	17



## Remerciements

Pour tout son support et ses précieux conseils, je souhaite remercier mon directeur de recherche Patrick González. Merci pour ton écoute et ta grande patience dans ce grand projet. Je suis reconnaissant de ton soutien tout au long de mon travail et qui m'a permis d'aboutir dans ma formation académique. C'est un marque d'attention que je n'oublierai jamais.

Merci aussi à Jean-Thomas Bernard pour sa contribution au lancement de ma recherche et pour m'avoir mis en rapport avec les intervenants qui m'ont épaulé.

Merci à Gaz Métro pour leur soutien financier à ma formation de maîtrise en économie. Sans leur bourse, je n'aurais pu avancer autant que je l'ai fait au début de ma recherche. J'apprécie cette contribution au plus haut point.

Entre autres chez Gaz Métro, merci à l'équipe de la direction des grands projets et particulièrement à Yannick Rasmussen de m'avoir accueilli à deux reprises. J'ai énormément apprécié de connaître l'expérience de travail dans ce groupe dynamique et généreux. Merci à Yannick pour son soutien durant mes deux étés, ses précieux conseils et son soutien dans les moments plus difficiles.

Finalement, merci à Ressources Naturelles Canada et l'équipe de Hertsel Labib, sans qui ce projet n'aurait jamais pu être mené à terme. Merci de m'avoir accueilli et de m'avoir présenté votre travail. Cette contribution à ma formation ne sera jamais oubliée. Cette ouverture démontre un énorme potentiel d'échanges entre les mondes de la recherche académique et gouvernementale. J'espère qu'à travers mon humble contribution, de nouveaux ponts pourront être construits et permettront de développer des systèmes plus performants pour la société canadienne.

Merci à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à ce mémoire.



# 1. Introduction

En 2005, l'agence d'information énergétique des États-Unis (EIA – *Energy Information Administration*) estimait que le prix du pétrole brut entre 2010 et 2020 évoluerait dans une fourchette de 35 \$ US à 39 \$ US (EIA, 2005). Un an plus tard, l'EIA prévoyait que le prix du brut en 2010 atteindrait plutôt 47,30 \$US (EIA, 2006). La même année, Ressources Naturelles Canada (RNCan) soulignait qu'en 2005, le baril se transigeait à 66 \$ US, soit à un niveau semblable en termes réels à celui de la fin des années 1970 et du début des années 1980 (RNCan, 2006). Bien que RNCan reconnaissait que des menaces inhabituelles planaient sur l'environnement sociopolitique et économique de l'époque (terrorisme mondial, pressions géopolitiques, accroissement de la demande asiatique, spéculation sur les marchandises, etc.), ses analystes considéraient qu'un baril à plus de 50 \$ US sur une longue période diminuerait la demande. Au final, RNCan prévoyait que le prix du baril ne dépasserait pas 45 \$ US pour la période 2010-2020. Enfin, en novembre 2007, alors que le pétrole se négociait à 75 \$ US le baril, l'Office national de l'énergie du Canada (ONÉ) prévoyait que ce prix diminuerait à 50 \$ en 2009 et demeurerait à ce niveau jusqu'en 2030. L'ONÉ considérait que les prix élevés des dernières années favorisaient la conservation et l'apport d'une offre supplémentaire.

En fait, le prix du pétrole brut n'a pas baissé comme le préoyaient ces trois institutions. Il a plutôt continué de monter pour atteindre plus de 140 \$ US en 2008 (en dollars de 2011), avant de s'effondrer des deux tiers suite à la crise financière de la même année. Depuis, le prix du pétrole a repris sa croissance. La possibilité d'un baril oscillant entre 40 \$ US et 50 \$ US, tel qu'estimé il y a 6 ans, apparaît aujourd'hui désormais bien mince.

Avec le recul, il est facile de critiquer l'EIA, RNCan et l'ONÉ pour leurs prévisions erronées. Mais celles-ci ont été établies à l'époque en toute bonne foi, en usant au mieux de l'information disponible. De plus, en établissant ces prévisions, ces institutions ne faisaient que répondre à la demande de plusieurs acteurs économiques pour un tel portrait de l'avenir. La valeur économique présente de plusieurs projets dépend des conditions futures du marché.

Pour prévoir l'évolution du prix de l'énergie, ces institutions recourent à de complexes modèles d'équilibre général qui visent à répliquer la situation économique actuelle. Ils procèdent ensuite à une analyse de statique comparative afin de comprendre l'incidence de différents chocs sur

des paramètres clés de ce modèle. Au final, un scénario de référence est choisi, selon la probabilité de réalisation que l'on accorde à ces chocs.

Si les prévisions de l'EIA, de RNCan et de l'ONÉ nous apparaissent si éloignées de la réalité, c'est qu'il est moins risqué de se concentrer sur des scénarios *business-as-usual* plutôt que sur des situations catastrophes consécutives à la réalisation d'événements peu probables.

Dans ce mémoire, j'analyse un de ces modèles d'équilibre général : le *Modèle pour l'analyse des politiques liées à l'énergie au Canada* (MAPLE-C) développé par RNCan. MAPLE-C est une adaptation du *National Energy Modeling System* (NEMS) développé aux États-Unis par l'EIA. Plus précisément :

1. J'étudie le fonctionnement du modèle MAPLE-C ;
2. J'analyse les effets d'une politique publique imposant au transport lourd l'utilisation de moteurs au gaz naturel comprimé à l'aide du modèle.

Un but corollaire à mon travail est d'expérimenter les difficultés à travailler avec un modèle d'équilibre général utilisé dans un cadre professionnel. Les contraintes économiques, conjoncturelles et politiques font du maintien et de l'accessibilité des caractéristiques complexes à développer et à soutenir à long terme pour ce type de modèle économique. En ce sens, MAPLE-C est un exemple significatif.

Le mémoire se structure ainsi : le chapitre 2 résume la revue de la littérature. Le chapitre 3 présente une description des modèles d'équilibre général et s'attarde plus précisément sur le fonctionnement et la structure de MAPLE-C. Finalement, le chapitre 4 explique la démarche d'une étude de cas réalisée avec le modèle MAPLE-C.

## 2. Revue de la littérature

Le modèle MAPLE-C, qui permet de simuler l'effet de politiques énergétiques sur l'économie, est fondé sur la théorie de l'équilibre général. C'est au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle que les fondements de cette branche de l'économie furent développés. Bien que la paternité en soit généralement attribuée à l'économiste français Léon Walras, ce dernier reconnaît l'apport de l'allemand Hermann-Henri Gossen (sur qui il publie un article en mai 1885) et de l'anglais Stanley Jevons. Concernant ce dernier, il affirme d'ailleurs que leurs travaux « [...] se confirment, se complètent et se font singulièrement valoir l'un l'autre.<sup>1</sup> »

Peut-être la contribution fondamentale de Léon Walras à ce domaine de recherche est son théorème de l'équilibre général du marché (Walras, 1926). Il l'énonce ainsi :

*À l'état d'équilibre général du marché, les  $m(m-1)$  prix qui règlent l'échange de  $m$  marchandises deux à deux sont implicitement déterminés par les  $m-1$  prix qui règlent l'échange de  $m-1$  quelconques d'entre ces marchandises avec ma  $m^{\text{ième}}$ .<sup>2</sup>*

Dans son livre, Walras généralise l'équilibre partiel de deux marchandises à un équilibre général entre  $m$  marchandises. Dès le départ, il postule une situation d'échange idéale, similaire à une situation physique sans frottement. Il élimine aussi le problème monétaire en signalant que la monnaie de circulation peut être ignorée.

En développant les équations deux par deux, il obtient comme résultat que pour  $m$  biens, on doit résoudre  $m(m-1)$  équations. Sa façon de faire, bien que simple, illustre parfaitement le problème des modèles d'équilibre général : comme chaque élément doit être lié à tous les autres, il s'ensuit une croissance exponentielle de la taille du modèle. En l'absence de ressources capables d'exécuter les calculs requis, l'équilibre général est difficilement utilisable. C'est une des raisons qui expliquent que ce concept ne connut pas une grande popularité avant le XX<sup>e</sup> siècle.

D'ailleurs, Decaluwé *et al.* reprend l'apport de l'informatique pour expliquer l'intérêt récent aux modèles d'équilibre général (Decaluwé, 2001).

---

<sup>1</sup> Cf. Walras (1885, 1926), p. VII.

<sup>2</sup> Ibid, p. 150.

Aujourd'hui, plusieurs plateformes et langages de programmation permettent de construire des modèles d'équilibre général, chacun ayant sa particularité ou son domaine d'intérêt. L'avantage de disposer de plusieurs outils est de corroborer les résultats et de préciser des aspects mis en plan par la programmation de certains logiciels. Ainsi, pour le gouvernement canadien, deux départements fédéraux, RNCan et l'ONÉ, produisent des chiffres pour les prévisions économiques et énergétiques du pays, chacun utilisant un modèle différent. RNCan emploie MAPLE-C, qui est l'objet de ce mémoire. L'ONÉ utilise plutôt le modèle *Energy 2020*, de la firme Systematic Solutions, Inc. Il s'agit d'un modèle macroéconomique multi-régions couvrant toute une gamme de producteurs et de consommateurs potentiels. Malheureusement, il a été impossible de trouver de la documentation suffisante sur ce modèle.

Dans le cadre des travaux sur ce mémoire, j'ai porté une attention particulière aux modèles spécialisés dans l'énergie. Ces modèles considèrent souvent l'impact de la pollution sur l'environnement. Le modèle d'équilibre général est un outil privilégié pour étudier ces questions. Par exemple, Fullerton et Heutel (2010) déterminent l'effet d'une taxe carbone sur l'économie américaine avec un modèle d'équilibre général simplifié. Dans le cas d'une taxe à l'usage, l'effet est régressif, mais lorsqu'elle est appliquée au prix des facteurs de production, la taxe peut se révéler progressive selon l'importance des gains en capitaux par les ménages les plus aisés.

L'imperfection de ce modèle se situe au niveau de l'analyse en vase clos de l'effet de la taxe, qui considère les répercussions économiques d'une transition vers une économie moins polluante. Si le bénéfice d'une « économie plus verte » n'est pas considéré dans le modèle (par exemple par une variable de bien-être social), toute variation d'un marché pur sans externalité entraînera une perte sèche pour l'ensemble de la société. Cet exemple souligne un autre aspect des modèles d'équilibre général : ils doivent être suffisamment détaillés pour offrir des analyses satisfaisantes, ce qui peut exiger de modéliser des aspects non-monétaires de la société, dont le bien-être et la qualité de l'environnement.

Bien que la question environnementale soit prépondérante dans le domaine de l'économie de l'énergie, elle n'est pas la seule en importance. D'autres modèles s'intéressent à des questions de géopolitique et de positionnement des ressources. C'est notamment le cas du *Baker Institute World Gas Trade Model* (BIWGT), élaboré conjointement par le James A. Baker III Institute for Public Policy

et le Stanford University Institute for International Studies, deux institutions qui s'intéressent à la géopolitique des marchés de gaz naturel (Hartley et Medlock, 2005).

Le développement du modèle correspond à la récente période de hauts prix du gaz naturel, avant l'adoption des technologies permettant la récupération du gaz de schiste. Cette période concorde avec le déploiement de projets de ports méthaniers pour transporter le méthane sous forme liquide. Les auteurs analysent l'impact de cette ressource sur les marchés mondiaux avec, comme hypothèse que le gaz naturel liquéfié représente un substitut plus « propre » au pétrole.

Le modèle laisse voir le Moyen-Orient et la Russie comme les plus importants joueurs dans la production et l'exportation de gaz naturel liquéfié. D'ailleurs, la Russie devient le pivot entre les marchés américains et asiatiques, exportant de l'Atlantique au Pacifique. Les plus gros consommateurs de gaz naturel liquéfié sont l'Europe et l'Amérique du Nord. D'ailleurs, fait intéressant à mettre en lumière, selon le modèle le Canada devient un importateur de gaz naturel. Cela fait contraste à la situation actuelle où le gaz de schiste a révolutionné la production canadienne.

Dans le cadre de ce mémoire, mes recherches se sont basées sur les travaux de Stephen P.A. Brown et de son équipe du *Resources for the Future*, un organisme indépendant spécialisé dans l'économie des ressources. Brown utilise le *National Energy Modeling System*, un modèle d'équilibre général développé par le *Department of Energy*<sup>3</sup> (DOE) américain pour déterminer si le gaz naturel (et le gaz de schiste plus spécifiquement) représenterait un pont entre une économie plus « sale », basée sur le charbon et le pétrole et une économie plus « propre » avec les énergies renouvelables.

Brown note que quelques années auparavant, l'opinion générale était que les États-Unis deviendraient progressivement dépendants des importations de gaz naturel liquéfié pour répondre à leurs besoins énergétiques. Or, depuis les avancées technologiques sur l'extraction du gaz de schiste, il souligne que les conditions existent pour réduire les émissions de gaz à effet de serre,

---

<sup>3</sup> Le *Department of Energy* est un département de l'administration américaine responsable de la politique énergétique et de la sécurité nucléaire.

puisque le méthane est relativement moins polluant que le charbon et le pétrole. L'auteur cherche donc à comprendre ce que représente ce changement pour l'avenir du pays.

Dans le cadre de ses recherches, il utilise NEMS pour simuler l'évolution future de l'économie américaine entre 2010 et 2030 et il établit une série de scénarios différents pour tester plusieurs hypothèses (cinq dans l'article d'avril 2010 et sept dans celui d'août 2010)<sup>4</sup>. Plus précisément, il cherche à connaître les effets d'une abondance de gaz de schiste et à comprendre la réorganisation de l'économie pour accommoder ce changement.

Les résultats suggèrent que l'abondance de gaz naturel modifiera de façon importante l'économie américaine, particulièrement au niveau de la production électrique. Brown note que sans la mise en place d'un système de contrôle des émissions (comme une bourse du carbone), les émissions américaines augmentent, favorisées par un prix plus faible pour le gaz naturel. Par contre, si un tel système est mis en place, l'abondance de gaz de schiste permet à l'économie d'atteindre les réductions des émissions tout en contrôlant les prix sur le marché énergétique. En ce sens, les résultats confirment la capacité du gaz naturel de favoriser la transition vers une économie plus propre.

---

<sup>4</sup> Les scénarios sont repris dans la section 4 du mémoire pour conceptualiser mon propre travail.

## 3. Les modèles d'équilibre général dans le domaine de la prévision énergétique

### 3.1. Les modèles d'équilibre général

La majorité des analyses réalisées par les économistes se font dans un cadre d'équilibre partiel, sous l'hypothèse *ceteris paribus*. En considérant que la question étudiée n'a pas une influence majeure sur le cours de l'économie, les économistes peuvent développer des sujets complexes de manière simple. Cependant, cette méthode n'est appropriée que lorsque les marchés étudiés ne représentent qu'une faible part de l'ensemble de l'économie.

Par exemple, supposons que le gouvernement envisage d'augmenter la taxe sur l'essence pour accroître ses revenus. On sait que la demande d'essence est fortement inélastique ; ainsi, en équilibre partiel et dans un horizon de court ou moyen terme, les revenus gouvernementaux augmentent. Mais, en réalité, le prix de l'essence affecte l'économie par de multiples canaux, notamment en déterminant le prix du transport des marchandises. En réaction à une hausse de la taxe sur l'essence, les transporteurs augmentent leur prix au kilomètre, ce qui force les marchands à augmenter leur prix de vente, une augmentation qui diminue en retour les quantités demandées de biens et de services et les revenus fiscaux provenant de la taxe sur ces biens et services. En somme, une hausse de la taxe sur l'essence entraîne une augmentation directe des recettes fiscales, mais une diminution indirecte du produit de la taxe de vente. Cet effet sera amplifié par la distance entre le producteur et le consommateur, un point qui n'est pas toujours abordé par les modèles en équilibre partiel. Si le modélisateur ne considère pas cet effet et d'autres qui en découlent, son analyse sera faussée ou même erronée.

Lorsque qu'une analyse en équilibre partiel ne peut répondre adéquatement aux questions du modélisateur, il convient alors de développer une analyse en équilibre général. Limitée seulement par la capacité de modélisation de l'économiste et de résolution de la machine, l'analyse en équilibre général explore les interactions entre tous les secteurs de l'économie. Chacun de ces secteurs n'est plus isolé des autres et ses réactions ne dépendent plus d'hypothèses externes formulées par l'analyste. Il est alors plus aisé de considérer les effets de rétroaction et de non-linéarité qui peuvent être ignorés dans le cas de l'équilibre partiel. Par exemple, un modèle d'équilibre général pourra

spécifier le taux d'imposition optimal pour financer une politique publique sachant que les impôts affectent le chômage et réduisent le budget gouvernemental par les prestations d'assurance-emploi.

Sous sa forme la plus simple, un modèle d'équilibre général est constitué d'une série d'équations qui lient des variables de prix et de quantité entre elles. Par exemple, un modèle simplifié d'une économie en autarcie inclura une équation de production, une équation de revenu des ménages et une équation de demande de biens. On regroupe des éléments de l'économie du travail, de l'économie de la consommation et de l'organisation industrielle, ce qui permet de travailler sur les interactions entre les divers secteurs. En raison de leur structure, les modèles d'équilibre général sont plus complexes et se composent généralement de plus d'équations et de variables que ceux en équilibre partiel. Par le passé, l'approche de l'équilibre général était peu employée parce qu'il était difficile de résoudre autant d'équations. L'avènement de l'ordinateur a permis le développement des modèles d'équilibre général calculable (MEGC) qui utilisent les machines pour solutionner les problèmes. Ainsi, il est devenu possible de développer des modèles plus complexes tout en maintenant la capacité de résolution.

Les variables d'un MEGC ne sont pas toutes endogènes : le modèle nécessite de l'information préalable, tout comme les magasins ne remettent pas à zéro leurs prix chaque soir pour les recalculer le lendemain. Ces variables exogènes permettent de réaliser des analyses de sensibilité très détaillées sur des chocs externes au système et d'observer les mouvements de ce dernier alors que l'économie tente de se rajuster. Les analyses de sensibilité portent souvent sur la définition des variables exogènes et sur les chocs qu'elles subissent.

La principale difficulté des modèles d'équilibre général vient de leur complexité. Plus ambitieux, ils postulent des liens entre des secteurs de l'économie qui peuvent être difficiles à traiter ou à confirmer. La construction des équations dépend des hypothèses du modélisateur, elles-mêmes basées sur des consensus entre économistes. Même si le travail est amplement documenté, le résultat doit être interprété, ce qui facilite la critique. De plus, calibrer les constantes contenues dans un MEGC exige une énorme quantité de données précises sur des sujets parfois nébuleux ou mal détaillés. Par exemple, les coûts marginaux de production sont notoirement difficiles à observer.

## 3.2. NEMS & MAPLE-C

L'idée du *National Energy Modeling System* (NEMS) apparut pour la première fois dans un discours du Secrétaire américain de l'énergie, en 1989. Pour répondre aux directives énoncées dans la stratégie nationale pour l'énergie du président George H. W. Bush, le gouvernement devait se doter de capacités prévisionnelles capables de mieux informer les décideurs publics. Les modèles dont disposait alors le *Department of Energy* étaient trop spécifiques et incompatibles pour satisfaire les exigences de la stratégie. Il fut donc décidé d'en construire un plus ambitieux, qui pourrait répondre aux attentes de l'administration en place.

La responsabilité du modèle incombe à l'*Energy Information Administration*, un sous-département indépendant du DOE responsable des analyses prévisionnelles et des statistiques. En plus de gérer l'utilisation de NEMS, l'EIA doit aussi publier des guides d'utilisation du modèle pour faciliter la diffusion et la critique des prévisions. L'organisation y accorde une grande importance pour s'assurer que les prévisions puissent être vérifiées et confirmées.

Peu après le développement de NEMS, le Canada importa le concept pour développer une version canadienne. Opéré par Ressources Naturelles Canada, les deux modèles sont très similaires. Toutefois, il existe une différence notable : aucune loi n'oblige RNCan à fournir des documents de support, ce qui nuit à la réputation du modèle et limite le partenariat extérieur. Cette absence de contribution amplifie les effets d'un investissement inadéquat pour ce projet exigeant. En conséquence, l'évolution du modèle canadien tarde derrière la version américaine.

NEMS et MAPLE-C sont des MEGC programmés en Fortran, un langage de programmation conçu pour l'élaboration de modèles mathématiques. L'interface UNIX assure le lien entre l'utilisateur et le modèle par l'entrée de commandes écrites. La structure des modèles est dynamique, c'est-à-dire que l'utilisateur peut modifier le code et tester ses propres hypothèses. Leur but est de couvrir l'ensemble des aspects de l'économie de l'énergie : la production, le transport, la conversion, la distribution et la consommation. Ils sont très détaillés et ils permettent d'étudier une multitude de formes d'énergie et d'utilisations finales. Leur développement a demandé la contribution d'économistes, d'informaticiens, de mathématiciens et d'ingénieurs.

L'énorme avantage que possèdent NEMS et MAPLE-C réside dans leur approche modulaire. Contrairement à d'autres modèles d'équilibre général qui opèrent dans un cadre informatique unique,

NEMS et MAPLE-C schématisent les différents pans de l'économie de l'énergie à l'intérieur de modules distincts. Cette façon de faire a plusieurs avantages : elle permet de favoriser l'émergence d'équipes spécialisées et décentralisées ; elle évite la congestion lorsqu'un travailleur doit exécuter des changements au code ; elle réduit les problèmes de maintenance d'un code trop gros et elle accélère la recherche des erreurs dans la plupart des situations.

L'inconvénient de cette structure est liée à la spécialisation des gens travaillant sur le modèle, qui risquent d'avoir une moins bonne compréhension du travail de leurs collègues. Cela devient complexe lorsque des erreurs affectent les solutions de plusieurs modules. Il n'est pas toujours apparent qu'un changement mineur dans le code d'un premier module puisse entraîner des répercussions graves dans un second module.

Les treize modules de NEMS et de MAPLE-C sont :

1. Le **module intégrateur** est le cœur du modèle, en ce sens qu'il en gère l'ensemble des activités. Son travail est de transférer l'information disponible aux modules en fonction, de coordonner les appels, de vérifier la convergence des résultats et de les archiver. Ce module n'effectue aucune prévision, mais s'occupe de calculer l'impact des politiques environnementales et les émissions de gaz à effet de serre.
2. Le **module de l'activité macroéconomique** tend à représenter le plus fidèlement possible l'économie du pays. À partir des prévisions économiques sont développés les besoins en énergie, ce qui place ce module au « sommet » de la hiérarchie du modèle. Il utilise notamment comme entrants la croissance démographique, l'environnement législatif et les interventions de la banque centrale. Il s'agit du seul module qui utilise des modèles externes au DOE et à RNCan : les États-Unis utilise le modèle de l'économie américaine de la firme IHS Global Insight, alors que le Canada emploie celui d'Infometrica. Des sous-modules font le pont entre ces modèles externes et NEMS et MAPLE-C.
3. Le **module du marché international de l'énergie** traite des cours mondiaux du pétrole. Il met en interaction les grandes régions productrices et consommatrices de l'or noir. Comme les États-Unis occupent une place considérable dans le marché du pétrole (surtout du côté de la demande), ce module a une grande importance pour NEMS. Les décisions canadiennes de production et de consommation affectent moins ce marché, ce qui explique que ce module est souvent désactivé par défaut par RNCan.

4. Le **module de la demande résidentielle** évalue la consommation énergétique des ménages. Celle-ci est déterminée en fonction des prévisions sur les types d'habitation et des utilisations finales de l'énergie, tel que présentées dans l'annexe 1. De plus, ce module calcule aussi la production d'énergie solaire et la production d'énergie à partir de la biomasse utilisées directement par les ménages.
5. Le **module de la demande commerciale** s'intéresse à la consommation énergétique des commerces. Un vaste éventail d'entreprises sont considérées (cf. l'annexe 2). L'estimation de cette consommation est établie à partir de l'espace commercial disponible à chaque année et des utilisations finales (cf. l'annexe 3). Tout comme celui-ci de la demande résidentielle, ce module peut gérer la production d'énergie alternative consommée par les commerces.
6. Le **module de la demande industrielle** estime la consommation d'énergie par le secteur industriel. Les entreprises y sont plus ou moins agrégées selon le niveau de détail nécessaire et divisées en trois catégories : les entreprises manufacturières intensives en énergie, celles non-intensives et les entreprises non-manufacturières. Les vingt divisions sont présentées en annexe 4. Ce module inclut la consommation de l'industrie pétrochimique, bien que cette dernière soit modélisée dans le module du marché du pétrole.
7. Le **module de la demande pour le transport** estime la consommation d'énergie utilisée pour le transport. Cette estimation est établie en fonction des prévisions de déplacement des personnes et des marchandises. Le module inclut quatre sous-divisions : le transport personnel et par les ménages, les déplacements aériens, le transport de marchandises et une catégorie fourre-tout qui inclut notamment le récréatif et le transport militaire (basé sur des estimations, puisque la plupart des chiffres sont secrets).
8. Le **module de l'offre de gaz et de pétrole** produit des prévisions de production et d'exploitation du gaz naturel et du pétrole (sous leurs différentes formes). Il permet entre autres d'évaluer les possibilités d'investissement et de développement sur l'horizon de prévision en fonction de la profitabilité attendue et de la localisation des réserves par rapport aux zones de traitement et de consommation.
9. Le **module de la transmission et de la distribution du gaz naturel** simule les mouvements du gaz naturel dans les gazoducs qui traversent les États-Unis et le Canada. Dû à la grande intégration des marchés du gaz nord-américain, ce module inclut une représentation du Canada pour NEMS et des États-Unis pour MAPLE-C. Il assure que la production de gaz naturel rejoint la

demande, mais n'affecte aucun travail à la production et la consommation de la ressource (sauf pour la propulsion du gaz dans les tuyaux).

10. Le **module du marché du charbon** s'intéresse à la production et au transport du charbon, de son lieu d'extraction à son lieu d'utilisation. Il considère quatre grades (ou qualités) thermiques et six utilisations, présentées en annexe 5.
11. Le **module des carburants renouvelables** prévoit la production d'énergie à partir de six sources alternatives, présentées en annexe 6. La production prévue tient compte de la disponibilité de certaines énergies renouvelables à différents moments de la journée. Les résultats de ce module sont utilisés directement par le module du marché de l'électricité, qui en dispose prioritairement la production. Il y a donc intérêt à faire rouler concurremment les deux modules. La production d'énergie alternative pour usage personnel (qui n'est pas envoyée dans le réseau électrique) est évaluée dans l'un ou l'autre des quatre modules de la demande.
12. Le **module du marché du pétrole** se concentre sur le raffinage et la vente des produits pétroliers. Entre autres, il lie les modules de production aux modules de consommation, puisque le pétrole brut en lui-même n'a que peu d'usage. La consommation du secteur pétrochimique est renvoyée au module de la demande industrielle pour y être compilée. Il inclut une représentation simplifiée des régions mondiales de raffinage.
13. Le **module du marché de l'électricité** s'occupe d'analyser la production attendue d'électricité selon la demande et les sources d'énergie disponibles. Il comporte aussi un sous-module sur la croissance de l'offre dans le temps en sélectionnant la technologie la plus efficace en fonction des contraintes.

Mis à part le module intégrateur, la plupart des modules de NEMS et de MAPLE-C sont autonomes : ils peuvent fonctionner seuls ou par petits groupes. Lorsque des modules sont désactivés, le modèle utilise les résultats de simulations précédentes comme données exogènes. L'utilisateur peut aussi soumettre ses propres données dans le cadre d'analyse de sensibilité, par exemple. Essentiellement, cela revient à imposer l'hypothèse *ceteris paribus* à certains pans de l'économie. Cette façon de faire permet de réduire les temps d'attente lorsque l'utilisateur réalise des tests sur des questions spécifiques qui ne demandent pas de précision absolue sur le reste de l'économie.

Les modules sont eux-mêmes composés de sous-modules qui traitent chacun d'une dimension particulière du sujet. Par exemple, le module des carburants renouvelables contient six sous-modules : un dédié à chaque source d'énergie étudiée. Le nombre de sous-modules et leurs objectifs varient selon le module.

La résolution de l'équilibre général est obtenue par la méthode itérative Gauss-Seidel pour résoudre un système d'équations linéaires. Cette méthode a été adoptée pour sa capacité à obtenir un résultat convergent lorsque le problème, exprimé sous forme matricielle, ne présente pas les caractéristiques nécessaires pour l'utilisation d'autres méthodes de résolution, comme la règle de Cramer ou l'élimination de Gauss-Jordan.

Plus précisément, la technique itérative Gauss-Seidel vise à séparer une matrice  $A$  en deux sous-matrices triangulaires,  $L_*$  et  $U^5$ , tel que :

$$A = L_* + U$$

On veut résoudre le système linéaire suivant :

$$Ax = b$$

Pour cela, la méthode réécrit l'équation ci-haut de la façon suivante :

$$L_*x = b - Ux$$

Puis, elle résout de manière itérative l'équation suivante :

$$x^{k+1} = L_*^{-1}(b - Ux^k)$$

Dans cette expression,  $k$  représente le numéro de l'itération en cours. En répétant l'opération plusieurs fois, la solution de  $x$  converge vers la vraie solution. Cette façon de faire permet de résoudre des problèmes mathématiques plus complexes que par les méthodes traditionnelles.

Une part non-négligeable du travail accompli par les modèles est d'appliquer cette technique à des systèmes non-linéaires. Pour MAPLE-C, la conversion des équations non-linéaires du modèle

---

<sup>5</sup> La matrice  $L_*$  comprend toutes les valeurs sous la diagonale principale, incluant la diagonale. Toutes les valeurs au-dessus de la diagonale sont nulles. À l'inverse, la matrice  $U$  comprend toutes les valeurs au-dessus de la diagonale, sans celle-ci. Les valeurs sous la diagonale sont nulles.

pour l'application de la méthode Gauss-Seidel dépend d'un logiciel externe développé par la firme Ketron. Je n'ai pas pu connaître les détails de cette transformation.

Le fonctionnement du modèle est relativement simple. Pour chaque année, le module intégrateur appelle tour à tour les composantes du système, qui utilisent l'information disponible pour générer des courbes d'offre et de demande qui sont retransmises aux autres modules. Les appels se font en boucle jusqu'à ce que le système produise une solution convergente qui satisfait un seuil de tolérance donné (généralement moins de 1 % ou 0,1 % de variation entre les itérations, selon le cas). L'ordre d'appel n'a que peu d'influence sur le résultat. Celui utilisé par NEMS est présenté dans l'annexe 7.

Il arrive qu'une solution ne puisse être obtenue, comme dans le cas de fonctions non continues. Lorsque cela se produit, le système oscille entre différentes valeurs. Pour prévenir cette situation, le système impose un nombre maximal d'itérations. Si la convergence n'est pas atteinte avant cette limite, le modèle clôturera après l'itération finale et soulignera, dans le rapport à l'utilisateur, quelles variables ont posé problème.

Une fois une solution trouvée, le programme archive les résultats de l'année et relance le cycle pour l'année suivante. Il procède ainsi sur l'horizon de prévision : pour la version de MAPLE-C étudiée, cet horizon s'étend de 1990 à 2020. Les modèles calculent toujours un peu plus loin dans l'avenir pour évaluer les décisions d'investissement, mais ces résultats ne sont généralement pas utilisés par le DOE et RNCAN. Avec tous les modules activés, il faut près de trois heures pour réaliser un cycle.

Chaque itération du modèle est divisée en deux sections. Au-delà de l'horizon de prévision, le modèle calcule aussi la valeur des variables pour la partie dite « historique ». Dans le cas de MAPLE-C, cette période couvre les années 1996-2012. Le programme utilise les données historiques pour calibrer les équations et les résultats du modèle. Par exemple, si pour chaque prévision historique le modèle sous-estime le prix du gaz naturel de 2 %, les prix futurs seront majorés du même pourcentage. Cette façon de faire permet de tenir compte d'éléments qui ne sont pas inclus dans le modèle, mais qui influencent de manière récurrente certaines variables qu'il

comporte. De plus, il s'agit d'une façon simple pour évaluer la validité du modèle et des changements apportés.

Pour de nombreuses décisions, particulièrement sur les investissements dans des projets d'exploitation, le programme doit réaliser lui-même des prévisions. Pour cela, chaque module dispose d'un mode prévisionnel qui tente d'anticiper, pour une année donnée, l'environnement économique futur. En théorie, le modèle est capable de définir un état final désirable et de procéder à rebours pour étayer les étapes menant à cet état. Toutefois, cette méthode n'est pas retenue car elle représente mal la façon dont les prévisionnistes travaillent. Le modèle fonctionne plutôt par anticipations myopes ou adaptatives.

Cette façon de faire permet au modèle de se rapprocher de la réalité en admettant l'existence de situation de non-équilibre où la répartition des ressources n'est pas faite de la façon la plus efficace. Après tout, il faut du temps à l'économie pour s'adapter à des changements brusques dans les prix de l'énergie. Par exemple, même si les prix de l'essence explosent, il faudra plusieurs années pour changer le parc automobile vers des véhicules plus performants. Les règles internes de NEMS et de MAPLE-C tentent donc de calculer le temps nécessaire pour modifier l'économie en réponse à un changement externe en fonction des moyennes sur les rénovations, les nouvelles constructions, les investissements et les comportements.

Les équations et les méthodes de calcul utilisées par le modèle varient selon le module et les besoins. Elles incluent l'économétrie, l'économie comportementale, l'optimisation, des algorithmes d'ingénierie et des courbes d'apprentissage. L'utilisation d'autant d'outils rend le modèle puissant et lui permet de faire des prévisions réalistes. Toutefois, pour être efficace, il demande une grande quantité d'information produite par divers organismes. Les modèles sont régulièrement mis à jour pour tenir compte des changements et des évolutions dans les environnements sociaux, économiques, législatifs et politiques.

### 3.3. Le modèle pour l'analyse des politiques liées à l'énergie au Canada

MAPLE-C est assez semblable à NEMS pour que le manuel d'instructions de NEMS puisse pallier à l'absence de documentation de MAPLE-C. Il en diffère afin de rendre compte des spécificités du Canada, dont le climat, la moins grande densité de population et l'environnement législatif. MAPLE-C est plus simple ; par exemple, la plus grande production d'hydro-électricité au Canada fait en sorte que le module sur l'électricité y est moins complexe. En outre, RNCan dispose de moins de ressources que son pendant américain, ce qui limite la capacité de l'organisme à ajouter des détails dans le modèle. Cette situation amène des choix difficiles, comme la décision d'ignorer certaines sources d'énergie marginales. Cela explique pourquoi la version la plus récente du modèle n'inclut toujours pas le gaz de schiste.

La figure 1 présente la page principale de MAPLE-C. Les informations présentées dans cette fenêtre sont générales et couvrent surtout le fonctionnement du modèle :

- L'onglet *Datecode* informe l'utilisateur sur le code unique généré pour le scénario qu'il est sur le point de réaliser. Le modèle tient le compte des scénarios exécutés pour une même journée. Dans la figure 1, le code **d122911a** signifie que le scénario a été réalisé le 29 décembre 2011 et qu'il s'agit de la première prévision du jour (le « a »). Les scénarios peuvent aller de « a » à « z », mais des restrictions dans la programmation empêche l'utilisateur d'aller à plus de 26 scénarios sans effacer la mémoire du modèle.
- La section **Output Folder** indique où sera créé le dossier contenant le scénario. Le modèle utilise toujours un répertoire par défaut, mais l'utilisateur peut forcer le modèle à diriger les résultats vers un autre répertoire.
- Le modèle crée un fichier (appelé « *scedes* ») contenant toute l'information sur les spécificités et les modalités du scénario. La section **Apply User Scenario** et **Specify User Scedes** permet à l'utilisateur de sélectionner ce fichier, ce qui lui évite de sélectionner manuellement toutes les options d'un scénario précédent, facilitant le travail d'évaluation et de test.

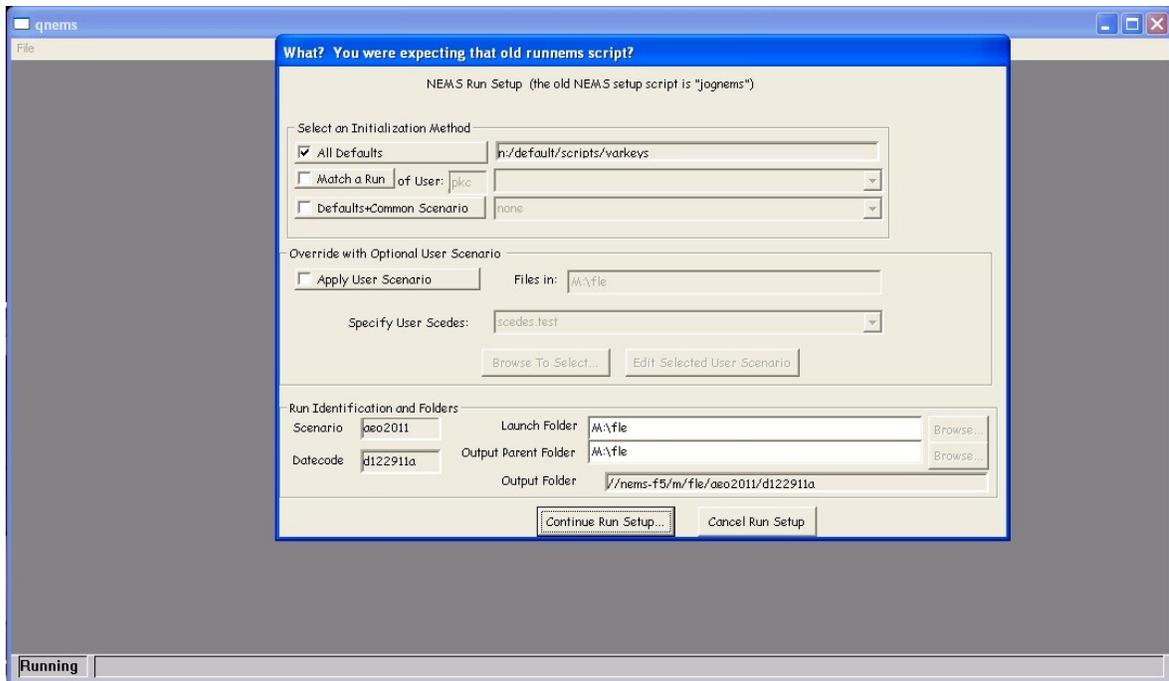


Figure 1 - Première page de MAPLE-C avec le script *runnems*

La personnalisation du scénario se fait dans la deuxième partie de la configuration, en cliquant sur le bouton *Continue Run Setup...*

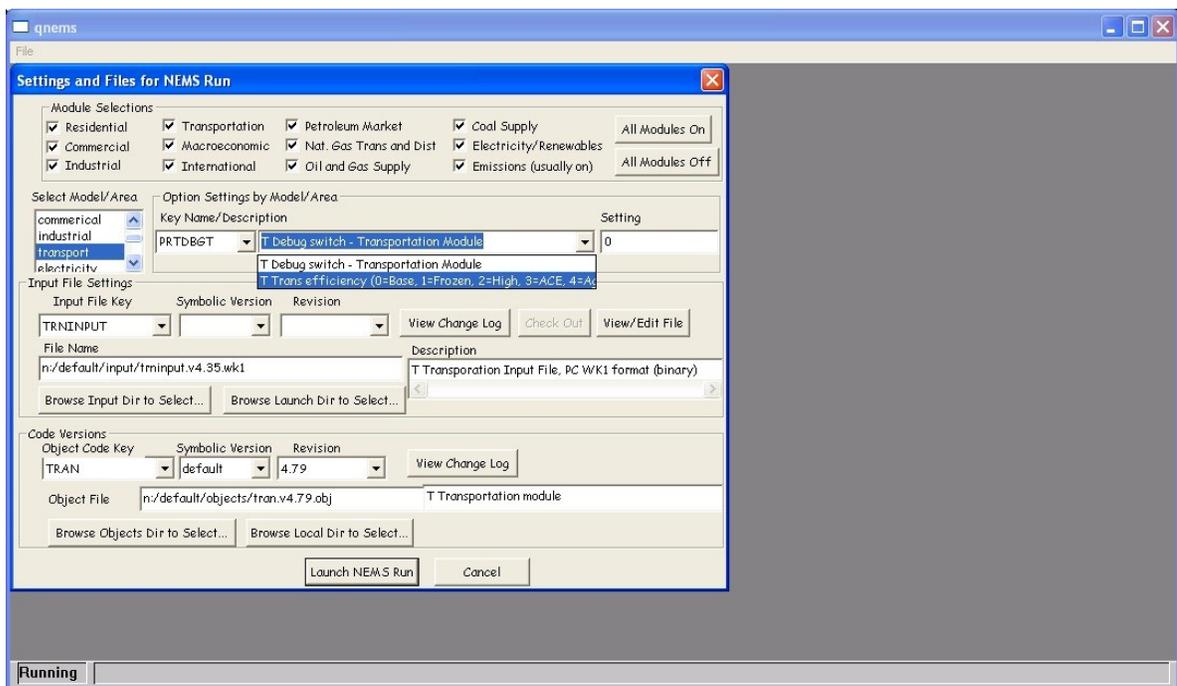


Figure 2 - Page de configuration de MAPLE-C avec le script *runnems*

Les options disponibles pour l'utilisateur sont divisées en quatre sections :

- La section **Module Selections** permet de choisir lesquels des modules seront activés pour le scénario.
- Les sections **Select Model/Area** et **Option Settings by Model/Area** permettent de modifier les propriétés et les hypothèses des modules. Ces possibilités favorisent l'expérimentation et la diversion. À titre d'exemple, dans le cas de la figure 2, pour le module des transports, l'option sélectionné **T Trans efficiency** permet à l'utilisateur de définir le niveau d'optimisme sur l'efficacité du transport dans le scénario. D'autres options couvrent les prix des ressources, l'efficacité énergétique et les niveaux de taxation.
- La section **Input File Settings** permet à l'utilisateur d'importer des fichiers de données autres que ceux utiliser par défaut. Il faut noter que ces fichiers modifiés doivent suivre le cadre de présentation des fichiers d'origine, sinon le modèle ne les considérera pas ou les lira de manière erronée.
- Finalement, la section **Code Versions** permet à l'utilisateur d'importer ses propres fichiers de code. Ceux-ci, programmés en FORTRAN, réalisent les calculs mathématiques nécessaires à l'atteinte de l'équilibre général. Pour peu que le code inclut les appels et les références aux bonnes variables<sup>6</sup>, l'utilisateur a beaucoup de liberté dans ses expérimentations.

---

<sup>6</sup> S'assurer qu'un code modifié s'inscrit dans la logique du modèle est un exercice particulièrement complexe, tel que confirmé par mes propres tests.

## 4. Étude de cas : Les effets de l'utilisation du gaz naturel dans le transport de marchandises sur l'économie énergétique canadienne

### 4.1. Définir les scénarios

Pour conclure l'analyse de MAPLE-C, je développe dans cette section finale ma démarche et les résultats sur l'utilisation du modèle. L'exercice s'appuie sur les deux articles du *Resources for the Future* présentés dans la revue de littérature. Essentiellement, je cherche à savoir si les résultats de Brown sur la capacité transitoire du gaz de schiste à atteindre une économie plus verte aux États-Unis sont valides au Canada.

Pour étudier l'incidence de l'exploitation des gaz de schiste, Brown et ses collaborateurs recourent au NEMS. La version utilisée par RFF date de 2009 et comporte quelques modifications par rapport à celle utilisée à l'époque par l'*Energy Information Administration* : elle tient compte de certains règlements sur l'énergie dans le plan de relance économique de 2009 et inclut l'application de normes plus contraignantes pour le *Corporate Average Fuel Economy*, tel qu'exigé par l'administration Obama.

À partir de ce modèle, Brown et al. simulent sept scénarios pour étudier l'effet à long terme du gaz de schiste et de l'exploitation du gaz naturel en général (Brown et al. 2010a et 2010b).

Les scénarios sont les suivants :

1. **The Baseline Case** : Le premier scénario constitue la référence à partir de laquelle les auteurs comparent les simulations. Il s'agit d'une situation *business-as-usual* qui utilise les prévisions de l'EIA sur le gaz de schiste (stock disponible de 269,3 milliards de pieds cube). Les résultats de ce scénario se comparent à ceux de l'EIA publiés dans l'*Annual Energy Outlook 2009*.
2. **Some Implications of Abundant Natural Gas Supply** : Le second scénario est lui aussi *business-as-usual*, mais utilise des prévisions plus optimistes sur le gaz de schiste. Celles-ci proviennent du *Potential Gas Committee* (PGC) qui estiment la quantité de gaz de schiste recouvrable à 615,9 milliards de pieds cube. Les auteurs modélisent ce changement en

augmentant la production de gaz de chaque puits, ce qui se traduit par une plus grande quantité de méthane disponible par puits à un coût plus faible, en accord avec l'opinion de l'industrie sur les avancées technologiques.

3. **Low-Carbon Policy without Abundant Natural Gas** : Le troisième scénario reprend le cas de référence avec les prévisions de l'EIA sur le gaz de schiste et y ajoute une bourse du carbone pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. La bourse a pour effet de réduire le prix reçu par les producteurs et d'augmenter celui payé par les utilisateurs.
4. **Low-Carbon Policy with Abundant Natural Gas** : Le quatrième scénario évalue les effets de la bourse du carbone présentée ci-dessus lorsque les prévisions sur le gaz de schiste suivent celle du PGC. Ainsi, cette simulation étudie deux effets contraires : la plus grande quantité de gaz naturel à un prix plus faible tend à augmenter la consommation d'énergie et, par ricochet les gaz à effet de serre, alors que la bourse du carbone a l'effet inverse.
5. **Limits on Nuclear and Renewable Power Generation** : Le cinquième scénario reprend les détails du quatrième, mais impose des restrictions sur les alternatives renouvelables. Ces restrictions sont modélisées par les auteurs comme une vision pessimiste sur les énergies vertes, une opposition féroce du public face au nucléaire et des avancées technologiques plus lentes que prévues pour l'éolien. Ce scénario étudie la réorganisation de l'économie pour réduire les émissions polluantes lorsque les alternatives vertes sont limitées.
6. **LNG (liquefied natural gas) Trucks with Abundant Natural Gas** : Le sixième scénario reprend une nouvelle fois la situation du deuxième scénario et y introduit une politique de pénétration agressive de véhicules lourds fonctionnant au gaz naturel liquéfié. Cette approche permet d'étudier les changements amenés par une augmentation de la demande de gaz naturel qui ne touche pas directement au prix, contrairement à la bourse du carbone.
7. **Maximum Natural Gas Demand Growth with Abundant Natural Gas** : Le septième et dernier scénario reprend les éléments des scénarios 4, 5 et 6 pour simuler une augmentation massive de la demande de gaz naturel dans un contexte d'abondance de cette énergie et de restrictions sur l'émission des gaz à effet de serre et sur les énergies alternatives.

Ces scénarios m'intéressent parce que Brown et al. ont utilisé NEMS, un modèle similaire à MAPLE-C, pour les produire. Je me suis attardé à répliquer trois simulations principales, soit les scénarios 1, 2 et 6. L'idée de l'exercice était de disposer d'un scénario de référence, d'un scénario où l'offre de gaz naturel augmente via l'exploitation du gaz de schiste et d'un scénario où, conjointement à

l'augmentation de l'offre de gaz naturel, une politique publique dirigeait cette hausse vers des technologies de transport alternatives.

Malheureusement, il m'a été impossible d'inclure une augmentation du gaz naturel dans le modèle, peu importe la source. Le problème vient probablement du fait que le modèle n'est jamais en équilibre parfait : il existe une différence entre l'offre et la demande, rapportée dans les fichiers d'output. Bien que je puisse augmenter l'offre de gaz, le modèle n'en tenait jamais compte. Pour le forcer à accepter mes changements, une modification du code aurait été nécessaire.

Au final, mon exercice se fonde sur deux scénarios : un scénario *business-as-usual*, tel que présenté par RNCAN et un scénario de politique publique portant sur l'utilisation du gaz naturel compressé comme carburant pour les véhicules lourds.

## 4.2. Intégrer les scénarios

Pour réaliser cet exercice, j'utilise la version de 2006 de MAPLE-C. C'est sur cette version que fut publié *Perspectives énergétiques du Canada : scénario de référence de 2006*. Bien que relativement âgé, le modèle de 2006 est fonctionnel et a déjà fait ses preuves.

Les simulations ont été réalisées en dehors des bureaux de RNCAN. Comme cela n'avait jamais été fait auparavant, quelques ajustements ont été nécessaires pour rendre le modèle fonctionnel. D'abord, au niveau technique, l'utilisation et la manipulation du modèle a exigé trois logiciels licenciés :

- **Compaq Visual Fortran v.6.6**, pour la modification du code FORTRAN ;
- **MKS Toolkit for Developers v.9.4**, pour le langage UNIX à partir duquel est construit l'interface de MAPLE-C ;
- **Ketron OML Mathematical Programming Software v.4.3**, pour exécuter certains calculs mathématiques.

Il est à noter que les versions de ces logiciels sont relativement vieilles et datent des années 1990. Le choix d'utiliser ces versions fut fait pour réduire le risque d'incompatibilité, puisque RNCan n'a pas adapté son modèle à des versions plus récentes. Les mises à jour furent donc évitées.

Comme il a été mentionné précédemment, le module macroéconomique utilise le modèle de l'économie canadienne d'Infometrica. Pour ses raisons financières et de simplicité, la licence pour cette partie de MAPLE-C n'a pas été achetée. En l'absence du modèle d'Infometrica, les données de l'économie canadienne deviennent exogènes et MAPLE-C utilise directement les résultats calculés par Ressources Naturelles Canada. Néanmoins, le module macroéconomique et sa partie non-Infometrica doivent être activés lors des simulations, sinon MAPLE-C a tendance à écraser les résultats des scénarios qui ne concordent pas avec la situation *business-as-usual* enregistrée dans sa mémoire.

L'ordinateur ayant servi au roulement des simulations de MAPLE-C a les caractéristiques suivantes :

- **Processeur** : Intel i7 Quad-Core 920 @ 2.67GHz ;
- **Carte-mère** : Gigabyte X58A-UD3R ;
- **Carte graphique** : Gigabyte Radeon HD 6870 ;
- **Mémoire vive** : Corsair Vengeance 12GB 3x4GB DDR3-1600 CL9-9-9-24 Triple Channel ;
- **Bloc d'alimentation** : Corsair TX750 750W ;
- **Système d'exploitation** : Microsoft Windows XP Mode (machine virtuelle) via Windows 7 Ultimate 64-bit avec Service Pack 1.

En raison de ses pièces hautement performantes, cet ordinateur fut sélectionné pour réduire le temps nécessaire au modèle pour accomplir les calculs mathématiques<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> Initialement, je comptais installer le modèle tel un logiciel traditionnel, directement sur la machine, sans autre intermédiaire. Malheureusement, cela s'est avéré impossible pour deux raisons. D'abord, l'architecture de l'un des logiciels mentionnés ci-haut entrerait en conflit avec l'architecture 64-bit de la version de Windows 7 que j'utilisais. Ensuite, le code de MAPLE-C exigeait la présence du réseau interne de RNCan pour réaliser ses appels de fichiers. En l'absence de ce réseau, le modèle refusait de fonctionner.

Pour résoudre ces difficultés, j'ai opté pour une alternative disponible avec Windows 7 : l'installation d'une machine virtuelle fonctionnant sous Windows XP. La machine virtuelle a accès au processeur dans son entièreté et à 2 giga-octets de mémoire vive. Cela m'a permis de résoudre le problème de l'architecture.

Au bout du compte, avec l'absence du modèle d'Infometrica et l'utilisation d'une machine virtuelle, il faut en moyenne 15 minutes au modèle pour résoudre une simulation.

Comparativement aux essais pour l'augmentation de l'offre de gaz naturel, la construction du scénario de politique publique sur le transport de marchandises avec le gaz naturel comprimé a été simple. Il s'agissait de modifier un fichier d'input dans lequel se trouvent les pourcentages de pénétration de cette technologie pour le transport médium et lourd. Les modifications apportées se trouvent dans le tableau 1.

**Tableau 1 - Pourcentage de pénétration des technologies pour le transport de marchandises**

Technologie	Type de transport de marchandises			
	Scénario de référence		Scénario politique publique	
	Médium	Lourd	Médium	Lourd
Diesel	90%	99,5%	85%	94,5%
LPG <sup>8</sup>	0,3%	0,05%	0,3%	0,05%
CNG <sup>9</sup>	0,5%	0,15%	5,5%	5,15%

Pour ce scénario, plusieurs pourcentages ont été testés. Tel qu'informé par RNCAN, les pourcentages à partir de 10 % ont causés des instabilités dans les résultats. Au final, les pourcentages furent majorés de 5 % pour les deux types de transport : médium à 5,5 % et lourd à 5,15 %. Contrairement aux travaux de Brown et al., ce pourcentage est fixe sur toute la projection et ne change pas au fil des années. Il prend aussi effet à partir de 1990 ; modifier la date de mise en action de la politique aurait nécessité un lourd recodage.

---

Pour éviter d'avoir à recoder le modèle, la machine virtuelle fut construite avec deux disques durs virtuels, ayant la même appellation que les réseaux chez RNCAN. Sur l'un des disques durs se trouvent les fichiers de code et d'intrants, alors que l'autre sert à recevoir les fichiers d'output. En résumé, j'ai simulé l'environnement de travail de Ressources Naturelles Canada pour permettre au modèle de tourner avec le minimum de modifications.

<sup>8</sup> LPG : *Liquefied Petroleum Gas*. Gaz de pétrole liquéfié.

<sup>9</sup> CNG : *Compressed Natural Gas*. Gaz naturel comprimé.

Les pourcentages initiaux représentent les estimations de Ressources Naturelles Canada sur la pénétration de cette technologie, basées sur les observations passées. Ainsi, la majoration peut être vue comme un soudain engouement pour le gaz naturel comprimé ou une obligation gouvernementale qui impose aux transporteurs d'acheter un plus grand nombre de ces véhicules. Les prix de la technologie ne sont pas modifiés, du moins pas de manière exogène.

### **4.3. Étude des scénarios**

Cette section présente un comparatif des résultats pour le scénario de référence et le scénario de politique publique. Pour rendre la présentation épurée, les résultats sont donnés pour la dernière année de prévision, soit 2020. Les résultats ne sont pas à prendre au pied de la lettre : la version du modèle étant passablement dépassée, ceux-ci ne sont plus représentatifs. De plus, le fonctionnement du modèle MAPLE-C sur une machine à l'extérieur des murs de Ressources Naturelles Canada n'avait jamais été réussi jusqu'à maintenant ; l'absence du réseau de RNCan pourrait entraîner des erreurs suite à l'absence d'une information particulière ou d'un support technique. Finalement, il n'est pas évident de comprendre comment le modèle interprète les changements effectués, d'autant plus qu'il peut facilement devenir instable. Pour l'exercice, ce qui importe est la direction du changement obtenu. Ainsi, les résultats sont donnés avec un nombre variable de chiffres après la virgule, selon l'ampleur du déplacement.

Commençons l'analyse par la production de gaz naturel en 2020, suite à l'application de la politique publique sur le gaz naturel comprimé.

**Tableau 2 - Offre de gaz naturel au Canada en 2020 (pétajoules par année)**

	Scénario de référence	Scénario du 5%	Différence en %
Nouvelle-Écosse	209,30	209,42	0,06%
Ontario	12,65	12,68	0,21%
Saskatchewan	69,71	69,76	0,06%
Alberta	1468,00	1467,63	<b>-0,03%</b>
Delta du Mackenzie	693,44	693,44	0,00%
Frontière	16,04	16,04	0,00%
<b>TOTAL</b>	<b>2469,15</b>	<b>2468,97</b>	<b>-0,01%</b>

Le tableau présente la production de gaz naturel, toutes sources confondues, dans les différentes régions productrices du Canada.

Suite à l'application de la politique publique sur le gaz naturel comprimé dans le transport, trois régions ont augmentées leur production pour répondre à la demande. Par contre, l'Alberta a légèrement baissé sa production, suffisamment pour compenser la hausse des autres provinces (ce qui explique le résultat négatif). Deux raisons peuvent expliquer cette situation :

1. Suite à la politique, une spécialisation s'est réalisée dans l'économie canadienne. Le tableau 3 montre quelques chiffres sur la production pétrolière au Canada. On note qu'elle a diminué partout, sauf en Alberta. Autrement dit, l'Alberta s'est spécialisée dans la production de pétrole, alors que les autres régions ont favorisé la production gazière.
2. Il est aussi possible qu'une forme de *hard coding*<sup>10</sup> empêche l'application des changements aux industries de l'Alberta. Cette façon de faire permettrait d'empêcher des résultats aberrants de se produire dans la province la plus touchée par l'industrie pétrolière, mais éliminant la flexibilité des exercices comme celui réalisé. Cela expliquerait l'apparente rigidité de l'industrie gazière en Alberta.

Cette hypothèse est renforcée par les résultats du tableau 3 sur la production pétrolière.

<sup>10</sup> Le *hard coding* est un raccourci de programmation parfois utilisé en informatique. Essentiellement, il s'agit d'ajouter dans le code du programme de l'information qui pourrait être incluse dans un fichier de configuration ou d'input. Par exemple, au lieu de disposer d'un fichier pour les prix de l'essence au Canada de 1990 à 2000, en *hard coding* cette information se trouverait directement dans le code du programme qui utilise cette information. Ainsi, un test de sensibilité sur les prix de l'essence obligerait de modifier le code du modèle, rendant ainsi l'utilisation de ce dernier moins flexible.

**Tableau 3 - Production de pétrole au Canada en 2020 (milliers de barils par jour)**

	Scénario de référence	Scénario du 5%	Différence en %
<b>Pétrole léger</b>			
Alberta	221,63771	221,63771	0%
Colombie-Britannique	38,25022	38,24973	-0,001%
Ontario	4,36079	4,36078	-0,0003%
Saskatchewan	62,06616	62,06565	-0,001%
<b>Pétrole lourd</b>			
Alberta	94,97432	94,97432	0%
Saskatchewan	265,13342	265,13324	-0,0001%

Le tableau 3 confirme que la production pétrolière a diminué dans toutes les régions, sauf l'Alberta, suggérant un effet de migration chez les producteurs. Ce résultat renforce l'idée que la représentation de l'industrie pétrolière albertaine est protégée des changements par une forme de *hard coding*.

Pour les autres régions, on observe une baisse de la production pétrolière. Combinée avec la hausse pour le gaz naturel, cela suggère un effet de migration chez les producteurs pour répondre à la demande. Pour confirmer, regardons différents prix en vigueur en 2020 pour le gaz naturel et quelques dérivés du pétrole.

**Tableau 4 - Prix pour le gaz naturel et des dérivés du pétrole au Canada en 2020**

	Scénario de référence	Scénario du 5%	Différence en %
<i>Prix pour le gaz naturel (dollars de 2003 par milliers de mètre cube)</i>			
Prix moyen au puits	222,24	222,37	0,06%
Prix moyen d'exportation	231,84	231,90	0,03%
Prix de livraison - Résidentiel	397,07	397,23	0,04%
Prix de livraison - Commercial	358,10	358,27	0,05%
Prix de livraison - Industriel	284,02	284,17	0,05%
Prix de livraison - Production électrique	311,61	311,73	0,04%
Prix de livraison - Transports	317,53	317,68	0,05%
<i>Prix pour certains dérivés du pétrole (cents de 2003 par litre)</i>			
Mazout - Résidentiel	55,5485	55,5482	-0,001%
Mazout - Commercial	50,885	50,884	-0,0004%
Gaz de pétrole liquéfié	54,48	54,45	-0,04%

On observe que les prix du gaz naturel ont augmenté pour l'ensemble des utilisateurs du gaz naturel. De la même façon, les prix pour les produits du pétrole ont diminué, ce qui appuie la théorie de la migration des producteurs.

En plus de mon explication sur la non-validité des chiffres obtenus, un mot peut être dit sur l'ordre de grandeur des changements observés. D'abord, contrairement aux travaux de Brown et al., le pourcentage de pénétration des véhicules lourds fonctionnant au gaz naturel liquéfié est plus petit ; alors qu'il est d'un peu plus de 5 % dans cet exercice, Brown utilise un pourcentage croissant de 10 % par année, culminant à 100 % des véhicules lourds vendus en 2020. Le changement du parc de camions de transport est donc beaucoup plus lent dans le cas actuel.

Au niveau de la consommation d'énergie, on observe les changements suivants :

**Tableau 5 - Consommation d'énergie au Canada en 2020 (pétajoules par année)<sup>11</sup>**

	Scénario de référence	Scénario du 5%	Différence
Distillat (diesel)	1 437,57	1 424,83	-0,89%
Carburant pour avions	355,07	355,07	0,002%
Gaz de pétrole liquéfié	119,32	120,49	0,97%
Essence	1 793,22	1 795,52	0,13%
Gaz naturel	3 574,10	3 576,68	0,07%
Énergies renouvelables	462,18	462,18	0,0001%

Le tableau 5 confirme que la mesure a été globalement bonne pour les carburants autres que le diesel. Tel que prévu, ce dernier a chuté alors que les véhicules lourds ont délaissé cette source d'énergie. Dans les cas des autres dérivés du pétrole, leur consommation a probablement été poussée à la hausse par les prix plus abordables de la ressource. Au niveau du gaz naturel, malgré l'augmentation des prix, la consommation de cette énergie a augmenté, entraînée par l'imposition de la politique publique. Le détail des changements de consommation pour le gaz naturel par secteur de consommation est présenté ci-dessous, dans le tableau 6. Finalement, la consommation des énergies renouvelables a augmenté, possiblement pour remplacer le gaz naturel devenu trop dispendieux dans le secteur de la production énergétique.

**Tableau 6 - Consommation de gaz naturel par secteur au Canada en 2020 (pétajoules par année)**

	Scénario de référence	Scénario du 5%	Différence
Résidentiel	710,92	710,84	-0,01%
Commercial	692,40	692,23	-0,03%
Industriel	841,28	841,27	-0,002%
Transport - CNG	1,30	5,57	330%
Transport - <i>Pipeline Fuel</i>	178,03	178,05	0,01%

<sup>11</sup> Tous secteurs de consommation confondus.

On observe une diminution de la consommation de gaz naturel dans les secteurs résidentiel, commercial et industriel, signe que la hausse des prix a amené les consommateurs à se tourner vers d'autres sources d'énergie. À l'inverse, la consommation de gaz naturel par le secteur des transports a connu un gain relatif fulgurant. Finalement, comme la consommation globale de gaz naturel est en hausse, plus d'énergie doit être utilisée pour le propulser dans les gazoducs. C'est ce que montre l'augmentation de la ligne *Pipeline Fuel*.

Le tableau 7 présente la consommation d'énergie pour le secteur des transports par source :

**Tableau 7 - Consommation d'énergie par source du secteur des transports au Canada en 2020 (pétajoules par année)**

	Scénario de référence	Scénario du 5%	Différence
Distillat (diesel)	972,39	959,65	-1,31%
Carburant pour avions	355,07	355,07	0,002%
Gaz de pétrole liquéfié	11,79	11,95	1,34%
Essence	1 730,18	1 732,48	0,1%
Gaz naturel	1,31	5,58	326,70%

Les résultats confirment que le diesel est le grand perdant de l'application de la politique publique dans le secteur des transports. Les autres produits du pétrole profitent de la baisse du prix de l'or noir pour augmenter leurs parts d'utilisation. À noter que le tableau ci-haut ne différencie pas entre le transport de marchandises et le transport des personnes.

Jusqu'à maintenant, les données confirment que plusieurs secteurs de l'économie ont bénéficié des prix du pétrole réduits. Or, une consommation en hausse d'énergie impliquerait une augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Après tout, le but de la politique publique était de réduire ces émissions en amenant les transporteurs lourds à utiliser le gaz naturel comprimé, moins polluant que le diesel.

Les données sur les émissions sont présentées ci-dessous :

**Tableau 8 - Émissions de gaz à effet de serre, par type et par secteur, au Canada en 2020**

	Scénario de référence	Scénario du 5%	Différence
<i>Émissions de gaz à effet de serre par type (mégatonnes par année)</i>			
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	734,65	734,14	-0,07%
Méthane (CH <sub>4</sub> )	33,60	33,60	-0,003%
Oxyde d'azote (N <sub>2</sub> O)	9,60	9,60	0,01%
<i>Émissions de gaz à effet de serre par secteur (mégatonnes de CO<sub>2</sub> équivalent)</i>			
Production électrique	118,16	118,17	0,01%
Résidentiel	46,30	46,29	-0,01%
Commercial	49,46	49,45	-0,02%
Industriel	237,37	237,39	0,01%
Transports	234,87	234,34	-0,23%

Dans l'ensemble, suite à l'application de la mesure, les émissions canadiennes de gaz à effet de serre sont en décroissance. Le dioxyde de carbone, et dans une moindre mesure le méthane, ont diminué, entraîné par la politique publique. À l'inverse, les émissions d'oxyde d'azote sont en hausse. Ces changements dans les émissions sont le résultat de la réorganisation que la politique publique a entraîné dans l'économie, alors que les secteurs se déplacent vers les sources d'énergie les moins dispendieuses.

Au niveau des secteurs, on observe la baisse attendue des émissions pour les transports, alors que les camionneurs utilisent de meilleurs moteurs pour l'environnement. Les secteurs résidentiel et commercial ont aussi diminué leurs émissions, probablement en réaction à la hausse du prix du gaz naturel. Le tableau 6 confirme d'ailleurs que la consommation d'énergie gazière est en baisse dans ces secteurs.

De légères hausses sont remarquées dans le secteur industriel et dans la production d'électricité. Dans les deux cas, il s'agit de réorientation de la demande vers des sources plus polluantes, comme le pétrole et le charbon, pour pallier aux prix plus élevés du gaz naturel.

Pour compléter cette analyse, le tableau 9 présente quelques changements macroéconomiques sur l'économie canadienne. Il importe de rappeler qu'en l'absence du modèle macroéconomique de Infometrica, le module macroéconomique de MAPLE-C n'est pas complet et que

certain résultats sont probablement erronés. Toutefois, les changements observés offrent une idée de ce qui se passerait réellement sur l'économie canadienne suite à l'application de cette mesure.

**Tableau 9 - Données sur l'économie canadienne en 2020**

	Scénario de référence	Scénario du 5%	Différence
Produit intérieur brut (PIB) (milliards de dollars de 1997)	1 569,11	1 569,14	0,002%
Indice de prix à la consommation (1992 = 100)	158,15	158,15	-0,0001%
Revenu personnel disponible (milliards de dollars de 1997)	1 018,77	1 018,78	0,001%
Rendement réel obligation 10 ans	4,98%	4,98%	0,01%
Intensité énergétique (pétajoules par dollar de 1997)	8,47	8,47	-0,05%
Taux de chômage	6,61%	6,61%	-0,003%

Suite à l'application de la politique publique, différents changements se sont produits dans la simulation de l'économie canadienne. Le PIB, le revenu personnel et le rendement réel sur les obligations gouvernementales de dix ans sont tous en hausse, alors que l'indice des prix à la consommation, l'intensité énergétique et le taux de chômage sont en baisse.

Les changements observés sur le PIB, l'indice des prix et le taux de chômage sont probablement erronés dû à l'absence du modèle d'Infometrica. En favorisant l'utilisation du gaz naturel dans le secteur des transports, un biais est créé dans la façon dont l'énergie est répartie entre les utilisateurs. En réaction à ce biais, l'économie canadienne devrait ressentir un ralentissement.

Cette analyse est supportée par le changement observée dans l'intensité énergétique, soit la quantité d'énergie (en pétajoules) dépensée par dollar de 1997. Plus l'intensité est élevée, plus l'économie est « efficace » en terme d'utilisation de l'énergie. Or, la politique publique cause une diminution de l'intensité, puisque les sources d'énergie ne sont plus dirigées vers leurs usages les plus efficaces. Cela suggère qu'il y a une perte dans l'économie canadienne, qui devrait affecter négativement le PIB et faire augmenter le taux de chômage.



## 5. Conclusion et recommandations

L'étude de MAPLE-C a permis d'analyser les hypothèses de Brown et al. sur l'économie canadienne en utilisant un modèle similaire. J'observe la même tendance que Brown et al. : face à une obligation d'utiliser plus de véhicules lourds fonctionnant au gaz naturel, on anticipe une diminution des émissions de gaz à effet de serre. Bien qu'il me soit impossible de quantifier cet effet, mon travail appuie les résultats de Brown et al. et suggère qu'une politique du genre au Canada favoriserait une économie plus verte.

L'exercice a aussi permis d'étudier le fonctionnement d'un modèle d'équilibre général calculable utilisé dans un cadre professionnel et d'en faire connaître l'existence. C'est sur ces points que le bénéfice a été le plus important. Contrairement à NEMS, l'attention portée à MAPLE-C par le domaine académique et la recherche privée est déficiente. En ce sens, il existe d'énormes possibilités pour le modèle en terme d'avancements et de supports. Toutefois, pour que des chercheurs s'intéressent au modèle, ce dernier doit être connu et son utilisation facilitée. En dehors des *Perspectives énergétiques du Canada : scénario de référence* publiées par Ressources Naturelles Canada, très peu de publications gouvernementales font référence à MAPLE-C. Ainsi, le modèle bénéficierait d'une meilleure couverture auprès d'un plus vaste public.

Une initiative intéressante pour RNCan serait de s'associer à plusieurs universités au pays et de développer un groupe de chercheurs externes ayant accès au modèle sans avoir à se présenter aux locaux du ministère. Contrairement aux employés de RNCan, les chercheurs universitaires pourraient s'attarder sur des questions particulières, favorisant le développement et le raffinement du modèle tout en contribuant à l'avancement de la recherche et à la formation de nouveaux étudiants.

En plus de la rédaction de documentation appropriée, le modèle bénéficierait d'une migration vers des logiciels plus récents. En particulier, l'utilisation de programmes incompatibles avec l'architecture 64-bit limite l'installation du modèle à des machines relativement âgées ou l'utilisation de méthodes alternatives par machines virtuelles, comme il a été présenté dans cet exercice. En plus de démocratiser l'utilisation du modèle à un plus grand nombre de personnes, l'emploi d'ordinateurs

plus récents et plus puissants réduiraient la perte de temps d'attente entre les simulations et éviterait le recours constant à de l'assistance informatique.

Finalement, la migration du modèle vers des logiciels plus récents devrait s'accompagner d'une harmonisation du système pour le rendre convivial. Notamment, le modèle bénéficierait d'un programme d'installation autonome et flexible, capable de s'ajuster aux différentes configurations d'ordinateurs. De plus, bien que favorisée par les programmeurs pour sa puissance, l'interface UNIX devrait laisser place à un environnement visuel, plus facile d'accès que l'utilisation de lignes de commandes et exigeant une moins grande formation en programmation.

Pour rentabiliser l'investissement fait dans le développement et la maintenance du *Modèle pour l'analyse des politiques liées à l'énergie au Canada*, il importe qu'un maximum de gens puisse contribuer à son évolution. Un modèle aussi complet et puissant devrait pouvoir servir un plus grand nombre d'organismes. Il faut donc le sortir de l'ombre et amener plus de chercheurs et d'universitaires à étudier la structure du modèle et réaliser des exercices de sensibilité sur ses variables.

## Bibliographie

- ALLAIRE, Maura & Brown, Stephen P.A. ; *U.S. Energy Subsidies: Effects on Energy Markets and Carbon Dioxide Emissions*, Resources for the Future, 11 juillet 2011, Washington D.C., 101 p.
- BERNARD, Alain & VIELLE, Marc ; *GEMINI-E3, a general equilibrium model of international-national interactions between economy, energy and the environment*, Springer-Verlag, 28 février 2007, Berlin, Allemagne, pp. 173-206.
- BROWN, Stephen P.A., GABRIEL, Steven A. & EGGING, Ruud ; *Abundant Shale Gas Resources: Some Implications for Energy Policy*, Resources for the Future Background Paper, Avril 2010, Washington D.C., 38 p.
- BROWN, Stephen P.A. & KRUPNICK, Alan J. ; *Abundant Shale Gas Resources: Long-Term Implications for U.S. Natural Gas Markets*, Resources for the Future Discussion Paper, Août 2010, Washington D.C., 36 p.
- BROWN, Stephen P.A. ; KRUPNICK, Alan J. & WALLS, Margaret A. ; *Natural Gas: A Bridge to a Low-Carbon Future?*, Resources for the Future & National Energy Policy Institute Issue Brief 09-11, Décembre 2009, Washington D.C., 12 p.
- DECALUWÉ, Bernard ; MARTENS, André & SAVARD, Luc ; *La politique économique du développement et les modèles d'Équilibre général calculable*, Les presses de l'Université de Montréal, 2001, Québec, Canada, 509 p.
- FULLERTON, Don & Heutel, Garth ; *Analytical General Equilibrium Effects of Energy Policy on Output and Factor Prices*, University of Illinois & University of North Carolina at Greensboro, Février 2010, 24 p.
- GABRIEL, Steven A. ; KYDES, Andy S. & WHITMAN, Peter ; *The National Energy Modeling System: A Large-Scale Energy-Economic Equilibrium Model*, Operations Research, Vol. 49, No. 1 (Janvier/Février 2001), pp. 14-25.
- GERBER, Alan S. & HUBER, Gregory A. ; *Partisanship and Economic Behavior: Do Partisan Differences in Economic Forecasts Predict Real Economic Behavior?*, American Political Science Review, Vol. 105, No. 3 (Août 2009), pp. 407-425.
- HARTLEY, Peter & MEDLOCK, Kenneth B. ; *The Baker Institute World Gas Trade Model*, Stanford Institute for International Studies & The James A. Baker III Institute for Public Policy (Rice University), Mars 2005, Houston, TX, 59 p.
- KRETSCHMER, Bettina & PETERSON, Sonja ; *Integrating bioenergy into computable general equilibrium models – A survey*, Energy Economics, Vol. 32 (2010), pp. 673-686.
- MCCLOSKEY, Deirdre ; *Other Things Equal – Economical Writing: An Executive Summary*, Eastern Economic Journal, Vol. 25, No. 2 (Printemps 1999), pp. 239-242.
- MCNEES, Stephen K. ; *How Large Are Economic Forecast Errors?*, New England Economic Review, Federal Reserve Bank of Boston, Juillet 1992, Boston, pp. 25-33.

MEDLOCK, Kenneth B. III ; *The Rice World Gas Trade Model: Development of a Reference Case*, Présentation PowerPoint, The James A. Baker III Institute for Public Policy (Rice University), 9 Mai 2011, 34 acétates.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL ; *The National Energy Modeling System*, National Academy Press, 1992, Washington D.C., 164 p.

PALTSEV, Sergey ; JACOBY, Henry D. ; REILLY, John M. ; EJAZ, Qudsia J. ; MORRIS, Jennifer ; O'SULLIVAN, Francis ; RAUSCH, Sebastian ; WINCHESTER, Niven & KRAGHA, Oghenerume ; *The future of U.S. natural gas production, use, and trade*, Energy Policy, Vol. 39 (2011), pp. 5309-5321.

SYSTEMATIC SOLUTIONS, INC. ; *Energy Model 2020 Overview* ;  
<http://www.energy2020.com/ENERGY%202020%20Model%20Overview.htm>.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION ; *Annual Energy Outlook 2011 with Projections to 2035*, DOE/EIA-0382(2011), April 2011, Washington D.C., 235 p.

WALRAS, Léon ; *Éléments d'économie politique pure ou théorie de la richesse sociale*, R. Pichon et R. Durand-Auzias Éditeurs, Paris, France, 1926, 505 p., accédé via Gallica Bibliothèque Numérique, propriété de la Bibliothèque nationale de France.

WIKIPEDIA ; *Electricity in Canada*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Electricity\\_in\\_Canada](http://en.wikipedia.org/wiki/Electricity_in_Canada), dernière modification le 19 novembre 2012.

WIKIPEDIA ; *General equilibrium theory*, [http://en.wikipedia.org/wiki/General\\_equilibrium\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/General_equilibrium_theory), dernière modification le 9 mai 2012.

WIKIPEDIA ; *Léon Walras*, [http://en.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9on\\_Walras](http://en.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9on_Walras), dernière modification le 29 avril 2012.

WIKIPEDIA ; *Price of petroleum*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Price\\_of\\_petroleum](http://en.wikipedia.org/wiki/Price_of_petroleum), dernière modification le 8 mai 2012.

# Annexes

## A.1 – Utilisations finales et sources d'énergie dans la demande résidentielle

1. Chauffage : électricité, gaz naturel, huile à chauffage, gaz de pétrole liquéfié
2. Climatisation : électricité, gaz naturel
3. Chauffage de l'eau : électricité, gaz naturel, huile à chauffage, gaz de pétrole liquéfié
4. Réfrigération : électricité
5. Cuisine : électricité, gaz naturel, gaz de pétrole liquéfié
6. Séchage de vêtements : électricité, gaz naturel
7. Congélation : électricité
8. Éclairage : électricité
9. Lave-linge : électricité
10. Lave-vaisselle : électricité
11. Télévision : électricité
12. Ordinateurs personnels : électricité
13. Ventilation de fournaies : électricité
14. Autres

## A.2 – Types de commerces pour le module de la demande commerciale

1. Assemblage
2. Éducation
3. Ventes de nourriture
4. Restauration
5. Soins de santé
6. Hébergement
7. Bureaux – Grand
8. Bureaux – Petit
9. Marchandage et services
10. Entreposage
11. Autre

## A.3 – Utilisations finales et sources d'énergie dans le secteur commercial

1. Chauffage : électricité, gaz naturel, distillat
2. Climatisation : électricité, gaz naturel
3. Chauffage de l'eau : électricité, gaz naturel, distillat
4. Ventilation : électricité
5. Cuisine : électricité, gaz naturel
6. Éclairage : électricité
7. Réfrigération : électricité
8. Équipement de bureau (PC) : électricité
9. Équipement de bureau (non-PC) : électricité
10. Autres

## **A.4 – Divisions utilisées dans le module de la demande industrielle**

1. **Entreprises manufacturières, intensives en énergie**
  - 1.1. Produits alimentaires
  - 1.2. Pâtes et papier
  - 1.3. Produits chimiques, sous-divisés en :
    - 1.3.1. Inorganiques
    - 1.3.2. Organiques
    - 1.3.3. Résines
    - 1.3.4. Agricoles
  - 1.4. Verres et produits du verre
  - 1.5. Ciment
  - 1.6. Fer et acier
  - 1.7. Aluminium
  - 1.8. Pétrochimie (modélisé dans le module du marché du pétrole)
2. **Entreprises manufacturières, non-intensives en énergie**
  - 2.1. Chaudronnerie
  - 2.2. Machinerie
  - 2.3. Ordinateurs et électroniques
  - 2.4. Produits du bois
  - 2.5. Plastiques et caoutchoucs
  - 2.6. Autres
3. **Entreprises non-manufacturières**
  - 3.1. Agriculture, culture
  - 3.2. Agriculture, autre
  - 3.3. Extraction, charbon
  - 3.4. Extraction, pétrole et gaz
  - 3.5. Extraction, autres
  - 3.6. Construction

## **A.5 – Utilisations du charbon considérées dans le module du marché du charbon**

1. Production d'électricité
2. Vapeur pour usage industriel
3. « Coking » industriel
4. Processus « Charbon-à-liquide » ou *Coal-to-liquids*
5. Exportations
6. Résidentiel et commercial (<1% de la demande)

## **A.6 – Sources d'énergie considérées dans le module des carburants renouvelables**

1. Biomasse

2. Gaz des sites d'enfouissement
3. Solaire (thermique / photovoltaïque)
4. Éolien
5. Géothermique
6. Hydro-électricité

#### **A.7 – Ordre d'appel des modules par le module intégrateur pour NEMS**

1. Module du marché international de l'énergie
2. Module de l'activité macroéconomique
3. Module du marché du charbon
4. Module de la demande résidentielle
5. Module de la demande commerciale
6. Module de la demande industrielle
7. Module de la demande pour le transport
8. Module du marché de l'électricité
9. Module de l'offre de gaz et de pétrole
10. Module de la transmission et de la distribution du gaz naturel
11. Module du marché du pétrole
12. Module des carburants renouvelables